

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN REGULADOR SOLAR DE POTENCIA DE BAJO
PESO PARA CONTROLAR LA CARGA DE LA BATERÍA DE UN VEHÍCULO SOLAR
APLICACIÓN A LAS BATERÍAS DE LI-PO EN EL VEHÍCULO SOLAR DEL SEMILLERO
DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES

MANUEL TREJOS BETANCUR

DIRECTOR:

EDGAR SALAZAR MARÍN
INGENIERO MECÁNICO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PEREIRA

2016

“En este lugar no perdemos demasiado tiempo mirando hacia atrás, camina hacia el futuro, abriendo nuevas puertas y probando cosas nuevas, sé curioso... porque nuestra curiosidad siempre nos conduce por nuevos caminos”

Walt Disney

este trabajo de grado va dedicado a todas las personas que me han ayudado a seguir este camino, a concluir esta etapa de mi vida, primero que todo, a Dios por darme esta oportunidad de poder alcanzar una de mis grandes metas en mi vida, a mis padres y mi familia, quienes me dieron todo el apoyo moral y espiritual para seguir adelante en este proyecto, a levantarme de los tropiezos con las piedras que he encontrado en el camino y a mi director de tesis, al ingeniero Édgar Salazar Marín, quien ha depositado toda su confianza en mí para ayudarme a culminar este reto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	7
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	9
1.3. OBJETIVOS.....	10
1.3.1. Objetivo general	10
1.3.2. Objetivos específicos.....	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Panel solar	11
2.1.1. Silicio monocristalino:	12
2.1.2. silicio policristalino:	12
2.1.3. Silicio amorfo:	13
2.2. Batería	14
2.2.1. Batería de plomo-ácido:	15
2.2.2. Batería de níquel-cadmio:.....	16
2.2.3. Batería de litio:	16
2.3. Sistemas de regulación solar	17
2.3.1. Regulador PWM:.....	18
2.3.2. Regulador MPPT:.....	19
2.4. Transistor IGBT	20
3. METODOLOGÍA.....	22
3.1. Identificación de controladores que satisfagan las necesidades del vehículo solar.....	22
3.1.1. Análisis de los elementos que funcionen como sistemas embebidos:.....	22
3.1.2. Clasificación y comparación del sistema según la relevancia para el proyecto:	22
3.1.3. Selección del sistema más adecuado para el circuito de control:	27
3.2. Diseño del controlador que satisfagan las necesidades del vehículo.....	27
3.2.2. Opciones de adecuación de voltaje para el sistema fotovoltaico:.....	31
3.2.3. Medir las dimensiones del lugar en donde se adecuará el sistema	35
3.3. Implementación y evaluación del sistema controlador.....	39
3.3.1. Diseño de la tarjeta de circuito en el programa EAGLE®:	40
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
4.1. CONCLUSIONES.....	42
4.2. RECOMENDACIONES	42
5. BIBLIOGRAFÍA	44

RESUMEN

Este proyecto busca diseñar e implementar un sistema de control capaz de medir señales eléctricas de un panel solar y de una batería de iones de litio en un vehículo solar, con el fin de aumentar la vida útil de dicha batería y de generar autonomía en cuanto a la recarga desde el panel, sin necesidad de estar conectándose manualmente. Debido a que actualmente no se cuenta con un sistema de controlador que cumpla con esta función, se opta por implementar dicho sistema para que el vehículo tenga mayor autonomía en cuanto a los ciclos de carga y descarga de la batería. Para ello, este trabajo tendrá un enfoque en investigación aplicada con diseño experimental, es decir, se tendrán en cuenta conceptos de investigaciones y resultados anteriores para dicha implementación; la cual se hará con el estudio de varios sistemas digitales para seleccionar el que mejor se adapte, con el Arduino UNO como la opción más tentativa para la implementación de este proyecto. Se usará el entorno de desarrollo EAGLE® para crear la placa de circuito y se construirá una caja protectora adaptada al vehículo solar.

1. INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental por la que está pasando el planeta Tierra a consecuencia de la mala administración de sus recursos por parte del ser humano, ha hecho que se busquen diferentes alternativas en pro de la salud del medio ambiente.

Algunas de estas es principalmente la concienciación general sobre el problema a partir de diferentes medios: comunicativos, educativos y sociales. Además de aportes realizados por la industria, disminuyendo así residuos nocivos para el medio ambiente, mediante el fomento en actividades como el reciclaje y la reducción del consumo innecesario de materia prima, entre otros.

Una de estas alternativas, es la planteada por Tesla Motors donde busca reducir la contaminación ambiental por medio de la implementación de carros eléctricos; ya que esta podría ser la problemática ambiental que más necesita ser atendida. Ford igualmente en el año 2014 creó su primer auto conceptual híbrido que funciona con energía eléctrica (a partir de la corriente domiciliaria y de paneles solares puestos en el techo) y con gasolina.

Es así como durante este trabajo se buscó crear un sistema de monitoreo y control de batería al vehículo del Semillero de investigación en Energías Renovables (SIER) mediante el uso del PWM (*Pulse Width Modulation* o conocido en español como Modulación por Ancho de Pulso) el cual permite alargar la vida útil de la batería e incrementar la autonomía del vehículo solar regulando la potencia suministrada desde el panel hacia la batería.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los avances tecnológicos han permitido al ser humano mejorar su calidad de vida, durante los últimos 200 años el hombre ha avanzado enormemente en las áreas de la producción y aplicación del conocimiento científico, en especial, la revolución industrial que trajo las fábricas, la máquina de vapor, la locomotora, los motores a base de: electricidad, vapor de agua y, el que más ha prosperado, gasolina [1].

A pesar de que la mayor parte de su energía se pierde en vibración y calor, el éxito del motor a gasolina fue tanto, que hasta el día de hoy se sigue usando y se espera que en el futuro lo siga siendo (hasta cuando las reservas de petróleo en el mundo así lo permitan). Sin embargo, el constante uso de este combustible fósil le está entregando factura al medio ambiente: el cambio climático y el efecto invernadero en la Tierra ya son un hecho, por esto, la industria está buscando alternativas para reemplazar o, por lo menos, disminuir el uso de automóviles que usen gasolina como fuente de energía [2].

Industrias como Tesla Motors Inc. están empezando a revolucionar el mercado con la comercialización de autos completamente eléctricos, aunque esto signifique pagar un alto valor ya que son vehículos deportivos de alta gama, con la promesa de que, a largo plazo, estos vehículos sean accesibles a la mayor parte del público [3].

No sólo la industria busca continuar dicha revolución, sino también estudiantes, profesores e investigadores de diferentes universidades a nivel mundial, quienes aspiran trascender el diseño e implementación de este tipo de vehículos. Una de estas es la Universidad Tecnológica de Pereira, en la cual, en el año 2014, el Semillero de Investigación en Energías Renovables (SIER) diseñó un vehículo que funciona con energía solar [4].

En el año 2016 el mismo semillero retomó la idea de un diseño más compacto usando sólo un panel solar, ya que el anterior modelo consistía de dos paneles solares haciéndolo más pesado, situación que le generaba más carga al motor.

Sin embargo, dicho vehículo no cuenta aún con un sistema que mida el estado de las baterías y la potencia que transfieren, puesto que, si no se hace un debido análisis y seguimiento a las mismas, puede haber un sobrecalentamiento de estas, haciendo que se produzcan gases en su interior lo cual ocasiona que se expandan y eventualmente dejen de funcionar o, en el peor de los casos, exploten. De igual manera, se debe revisar constantemente la energía que entregan, ya que debe ser suficiente para una adecuada conversión en energía mecánica.

Es por ello, que este proyecto está orientado a realizar un método que, por medio de un sistema embebido microcontrolado, proyecte al conductor por medio de una pantalla, el voltaje, la corriente y la potencia que entregan las baterías al motor, el estado de carga en porcentaje y si los paneles están cargando o no las baterías.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La gran cantidad de vehículos que abundan hoy en día en las grandes urbes es exorbitante, según el censo realizado por la OICA (*Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles*) en el 2014 se estima que hay más de 1.200 millones de vehículos alrededor del mundo en circulación, y que en Colombia se estima que hay más de 5 millones de ellos [5], según estos datos, la OICA estima que los vehículos producen cerca del 16% de emisiones de CO₂ a nivel mundial [6].

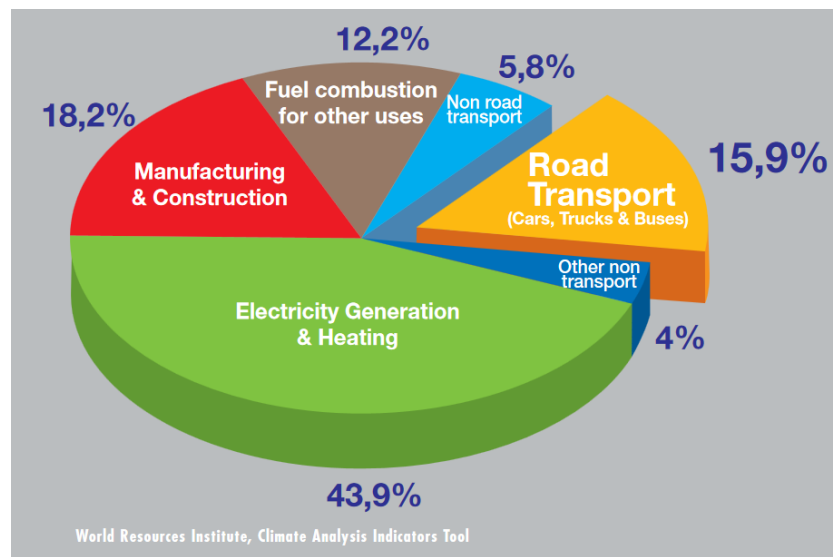


Figura 1. Gráfico en el que muestra las principales fuentes de emisión de CO₂ a nivel mundial.

Lo anterior explicado, da a entender que los fabricantes de automóviles deben replantearse la idea de empezar a usar un tipo de energía alterna para que, en la medida de lo posible, haya una transición paulatina de combustible fósil al uso de la electricidad o de células de hidrógeno.

Este es uno de los motivos para dicho trabajo: aportar a la solución de este problema al crear un sistema que sea capaz de tomar datos del panel y de la batería del vehículo solar del SIER y proyectarlos al piloto, para que este sepa cuál es el estado energético del panel y de la batería, lo cual incluye el voltaje, la corriente y la potencia que estos transfieren y si el panel está cargando la batería o no. La importancia de este sistema es evitar una sobrecarga o sobredescarga de la batería [7] (se puede llegar a recalentar debido a la exigencia del motor o reducir su vida útil y esto puede ser peligroso), permitiendo que el conductor se dé cuenta del estado actual de la batería.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un regulador solar de potencia de bajo peso para controlar la carga de la batería de un vehículo solar

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar de entre los elementos controladores existentes el más apropiado para las características del sistema controlador de carga del vehículo solar.
- Diseñar el sistema de control embebido que mejor se adapte a las necesidades del vehículo.
- Implementar y evaluar el funcionamiento del sistema controlador de carga, el estado de la batería y del panel solar.

2. MARCO TEÓRICO

En este apartado se abordan los conceptos de la energía renovable, específicamente el uso de la energía solar y su aprovechamiento con los paneles fotovoltaicos, qué tipos de paneles existen en el mercado y su implementación en vehículos eléctricos, cuáles son los elementos que conforman un circuito de energía fotovoltaica y cuál es la instrumentación necesaria para la recolección de información de estos sistemas de potencia.

2.1. Panel solar

Los paneles solares o fotovoltaicos, son placas (generalmente hechas en cristal) compuestas a partir de pequeños módulos denominados células; estas células son dispositivos que generan un voltaje (fuerza electromotriz) que ronda entre los 0.3 y los 0.7V cuando son expuestas a la luz solar, este fenómeno físico es denominado como efecto fotovoltaico. Estas células fotovoltaicas son creadas a partir de uniones PN de silicio monocristalino (semiconductor), es decir, se usan células de silicio con un dopaje tipo P (boro) sobreexpuestas a otras células con un dopaje tipo N (fósforo) con el fin de que, al interactuar con los fotones generados por la luz solar, éstos le entregan energía al semiconductor, excitando los átomos y creando huecos en la capa P y electrones en la capa N terminando así, en una diferencia de potencial entre las dos capas y una generación de corriente dependiente de la radiación solar transmitida [8].

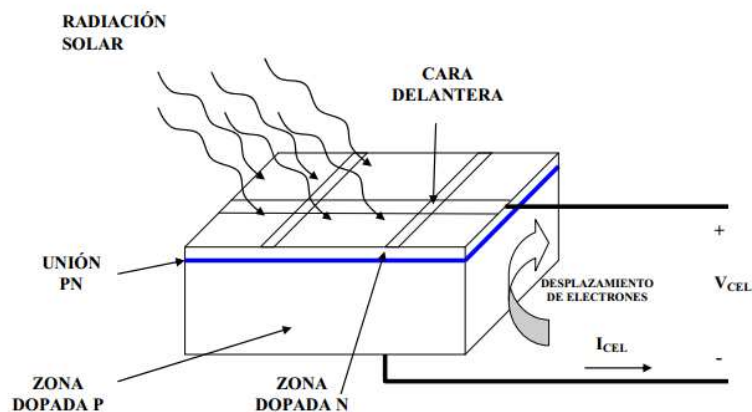


Figura 2. Esquema del funcionamiento de un panel fotovoltaico.

Existen tres tipos de células fotovoltaicas, estos son:

2.1.1. Silicio monocristalino: este tipo de variación supone que la estructura molecular del silicio está perfectamente alineada, es decir, que cada célula fotovoltaica de silicio es, literalmente, un cristal completo en donde su principal característica es su apariencia oscura con visos azulados. La ventaja de este tipo de estructura es su eficiencia en la absorción de la energía sola, siendo entre el 16% y el 25%.



Figura 3. Células fotovoltaicas monocristalinas.

2.1.2. silicio policristalino: a diferencia del monocristalino, estas células tienen una estructura conformada por varios cristales de coloración azul metálico, aspecto que hace que su eficiencia caiga por debajo del 15% (entre el 10% y el 14%) aunque cabe la posibilidad que iguale durante un corto plazo a la eficiencia de los monocristalinos. La ventaja de esta estructura es la facilidad de producción, haciendo que su precio sea considerablemente menor que las células monocristalinas.

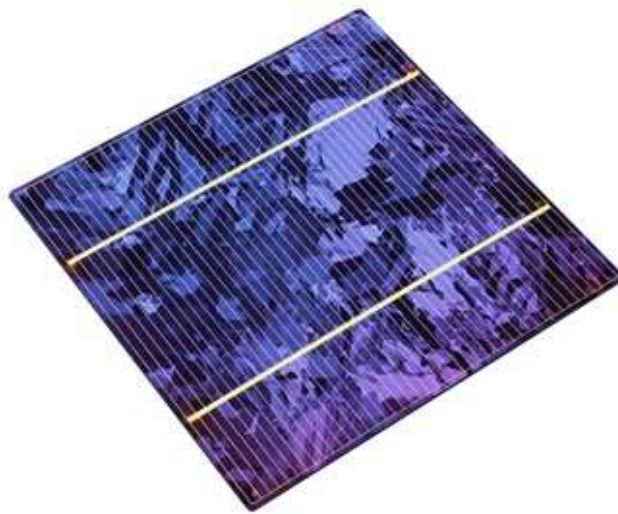


Figura 4. Célula fotovoltaica policristalina.

2.1.3. Silicio amorfo: este tipo de placa ya no consta de tipo alguno de célula, ya que su construcción molecular no está conformada por cristales. A simple vista, su apariencia es de color grisáceo o de color marrón, y su eficiencia es menor al 10%. Su simplicidad estructural la hace muy económica y su uso es normalmente para las calculadoras, debido a su buen rendimiento con la luz artificial [9].



Figura 5. Panel fotovoltaico con estructura amorfa.

2.2. Batería

Es un dispositivo que se encarga de acumular la energía eléctrica mediante reacciones electroquímicas, la principal función de las baterías en un sistema fotoeléctrico es almacenar la energía recogida por las celdas fotovoltaicas y liberarla cuando el clima no es favorable para que las celdas sigan recolectando energía; otra función que tienen las baterías en este tipo de sistema es de entregarle a la carga (red eléctrica, motores, etc.) una corriente mayor que la que pueden entregar las celdas solares.

El hecho de que suponga un ciclo de carga-descarga mucho mayor en estas baterías, indica que éstas tienen que ser bastante resistentes al desgaste y al paso del tiempo, es por esto que a las baterías usadas en los sistemas fotovoltaicos tienen como nombre “baterías solares”. Además de lo anterior dicho, las baterías solares se caracterizan porque admiten un elevado porcentaje de descarga, por ello, las baterías solares también suelen llamarse como “baterías de ciclo profundo” [10].

Las baterías, en general, se les calcula un índice denominado “profundidad de descarga” (DoD, que en inglés significa Depth of Discharge) el cual representa de forma porcentual la cantidad máxima de energía que se le puede extraer, el DoD puede variar dependiendo del tipo de batería, del material del que está hecha, su capacidad de almacenar la energía, entre otros tipos de variables, por eso se dice que, si una batería tiene un DoD muy elevado, su vida útil tiende a ser corta, caso contrario si el DoD es bajo [11].

El término “sobrecarga” posiblemente suene familiar para la mayoría de la población y lo asocian a un esfuerzo extremo al que someten a la batería, caso que la puede hacer estropearse, quemarse o estallar, pero, existe un término que quizás es poco conocido, este término se le llama como “sobredescarga”, este término se define como el desgaste electroquímico en el interior de una batería debido a una descarga excesiva, en otras palabras, su DoD aumenta bajando así su rendimiento de carga y por ende, su vida útil [12].

En el mercado predominan tres tipos de baterías para el uso de sistemas fotoeléctricos: las baterías de plomo-ácido, baterías de níquel-cadmio y baterías de litio.

2.2.1. Batería de plomo-ácido: este tipo de batería se conoce también como baterías inundadas, de electrolito o abiertas; inundadas o de electrolito debido al uso de ácidos (usado comúnmente el ácido sulfúrico) mezclado en proporción con agua destilada, y abierta porque este tipo de batería necesita unos tapones o aberturas para mantenimiento o escape de gases por evaporación. La gran desventaja de estas baterías es su peso, gracias al uso de placas de plomo como electrodos, son colosalmente pesadas para una aplicación en la que la prioridad principal es el peso.

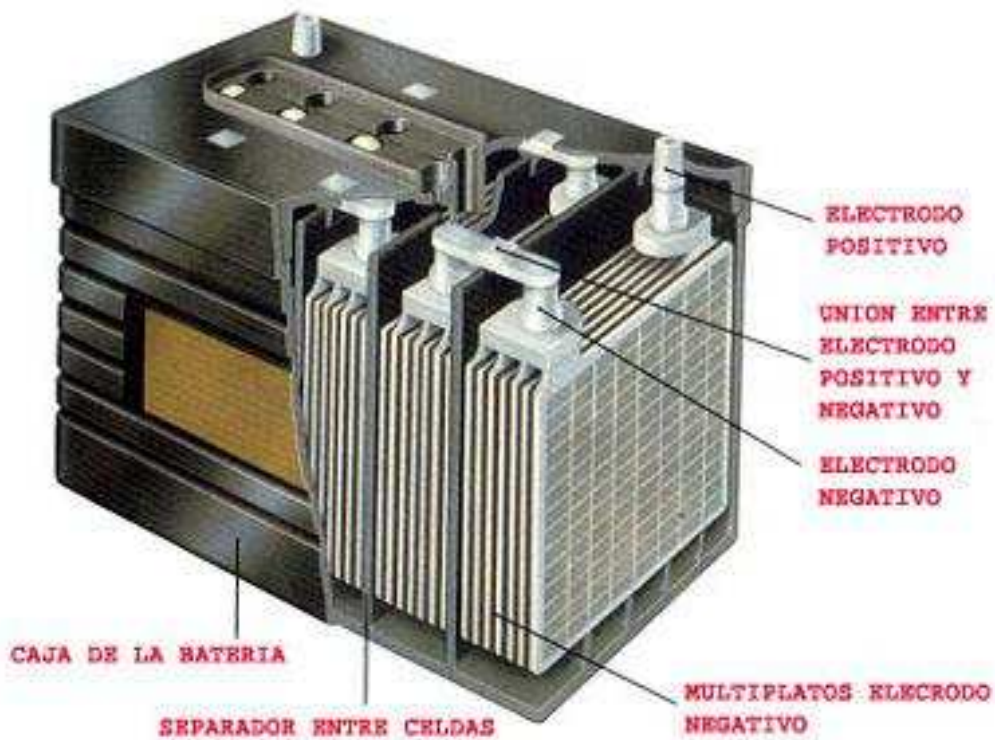


Figura 6. Esquema de composición de una batería de plomo-ácido.

2.2.2. Batería de níquel-cadmio: a diferencia de las baterías Pb-ácido, este tipo de baterías son secas, es decir, no tienen la necesidad de un líquido con electrolitos que funcione como unión entre celdas, además, no es abierta, lo que quiere decir que es totalmente hermética debido a que no genera vapores o gases nocivos (los que produce las baterías Pb-ácido). Este tipo de baterías también es muy usado en los sistemas fotovoltaicos pero tienen el inconveniente de ser más costosas respecto a las baterías de Pb-ácido, por lo cual son más raras en su uso, y también presentan el mismo inconveniente del peso.



Figura 7. Esquema de composición de una batería níquel-cadmio.

2.2.3. Batería de litio: Estas baterías se pueden subdividir en dos tipos: baterías de polímeros de litio (LiPo) y baterías de iones de litio (Li-ion).

- **Baterías de polímeros de litio:** las LiPo, como comúnmente se conocen, son celdas de litio normalmente con una denominación de 5V unidas en paralelo para aumentar la capacidad de corriente, se caracterizan por ser de forma cuadrada o rectangular, son de aspecto metalizado y de consistencia suave; el término “polímero” se da por dos conceptos: el primero es porque se usa un plástico delgado en donde se depositan las moléculas de litio (o iones de litio) y el segundo, es porque se usa un electrolito polimérico, es decir, está en un estado gelatinoso, por esto, las baterías LiPo no tienen el defecto que tienen las demás baterías comunes que es lo que se denomina como “leaked battery” o goteo de batería.

- Baterías de iones de litio:** comercialmente denominadas como Li-ion, son baterías rígidas, normalmente de aspecto cilíndrico, que usan sales de litio que es donde se almacenan los iones para las reacciones electroquímicas, su efectividad en cuanto al desgaste por los ciclos de descarga y su DoD relativamente bajo, las hace ideales para el uso de acumuladores de carga para la industria electrónica de consumo masivo. El único inconveniente con estas baterías son su sensibilidad a las altas temperaturas, llegando a estropearse o estallar, es por ello que necesitan un circuito de protección para evitar estos inconvenientes, circuitos que encarecen su producción y reducen su desarrollo para el consumo masivo.

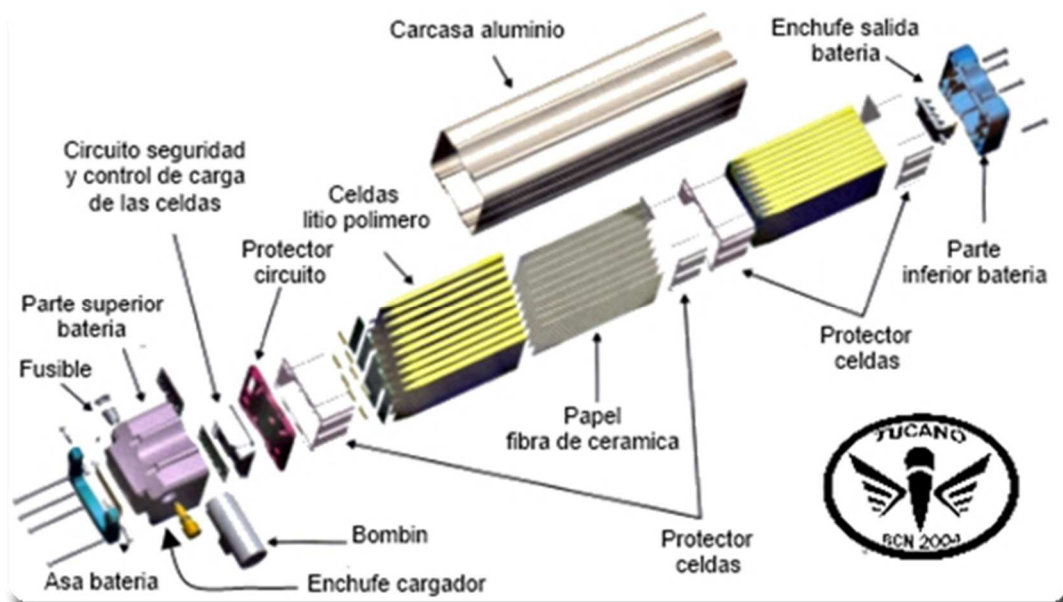


Figura 8. Diagrama de composición de una batería de litio.

2.3. Sistemas de regulación solar

En los sistemas fotovoltaicos se tienen tres elementos esenciales, los paneles y baterías que se explicaron anteriormente y también existe otro elemento al que se llama como “regulador solar”, donde su función es graduar la potencia que le entrega el panel a la batería, como también puede tener otros elementos tales como luces indicadoras, pantallas de estado del sistema, puertos adicionales para otros periféricos, comunicación serial, etc.

En general, es el punto intermedio que existe entre el panel solar y la batería, este componente es fundamental para la vida útil de la batería, ya que este la protege de sobrecargas y sobredescargas, ejerciendo un control de carga en ella manteniéndola siempre entre unos porcentajes máximos y mínimos de recarga y descarga [13].

Existen dos tipos de reguladores solares, los de modulación por ancho de pulso (PWM) y los que usan seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para la recarga de la batería.

2.3.1. Regulador PWM: este regulador usa la técnica de modulación por ancho de pulso (*Pulse Width Modulation*) para transferir la potencia generada por el panel para la recarga de las baterías, la transmisión de la corriente decrece naturalmente a medida que se recargan, mientras que el voltaje irá variando a medida que se detecta la recarga de la batería, este proceso se hace mediante una propiedad de la modulación a la que se llama “ciclo de trabajo” (*duty cycle*) en donde la señal cuadrada varía su ciclo útil, estos cambios se miden en porcentajes, es decir, si el ciclo de trabajo de la señal PWM está al 50%, quiere decir que está transfiriendo la mitad del voltaje que produce el panel, si está al 25% se entregando $\frac{1}{4}$ de la potencia suministrada a la batería.

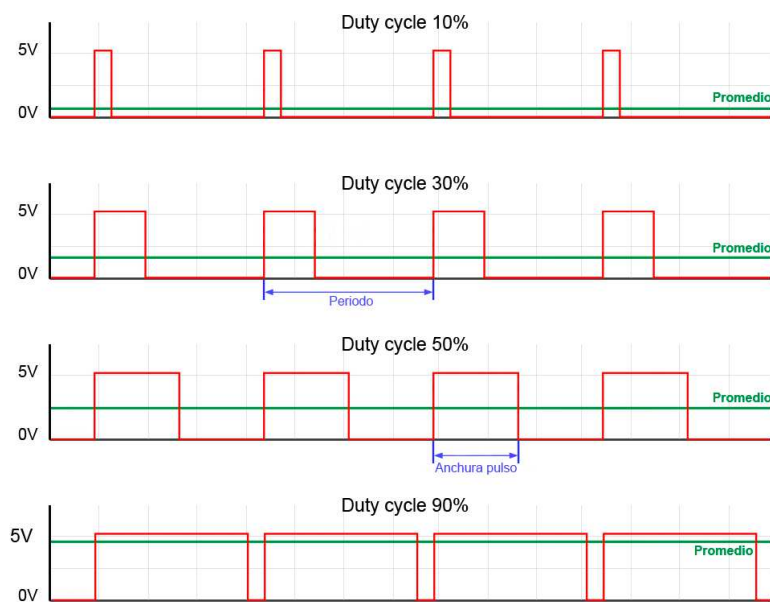


Figura 9. Gráfica que representa una señal PWM.

Este tipo de regulador tiene las limitaciones de que el voltaje nominal de la batería y del panel, tienen que ser relativamente iguales o cercanos entre sí, así que no es ideal, o por lo menos, aceptable para una instalación que requiera una demanda superior de energía.

2.3.2. Regulador MPPT: Este regulador es técnicamente una variación del regulador PWM, su única diferencia es que integra un circuito electrónico de manejo de potencia, un reductor DC-DC, en el ámbito de la ingeniería llamado “convertidor buck”; un convertidor buck tiene como función reducir una potencia entrante relativamente alta, a una de salida relativamente baja (así como funciona un transformador de potencia en voltajes AC).

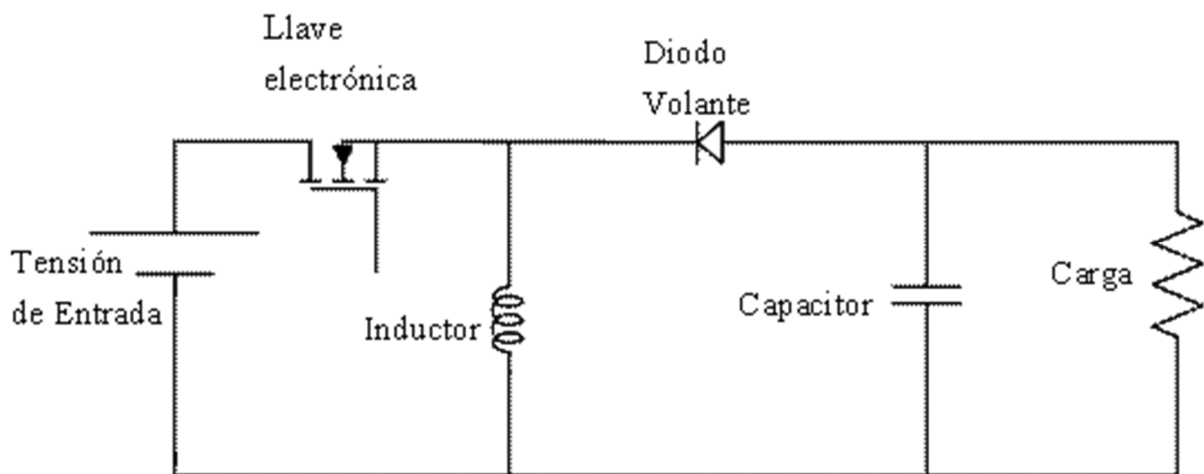


figura 10. Diagrama circuital de un convertidor buck.

En este caso, en un regulador MPPT, la potencia de salida, irá variando a medida que el sistema del regulador detecte que la carga de la batería aumente o disminuya, esta variación se da por un transistor que funciona como interruptor que se activa y desactiva a altas frecuencias, variando así la carga y descarga del condensador y de la bobina, variación que hace que los valores de voltajes y corriente se modifiquen en función de la velocidad de interrupción del transistor.

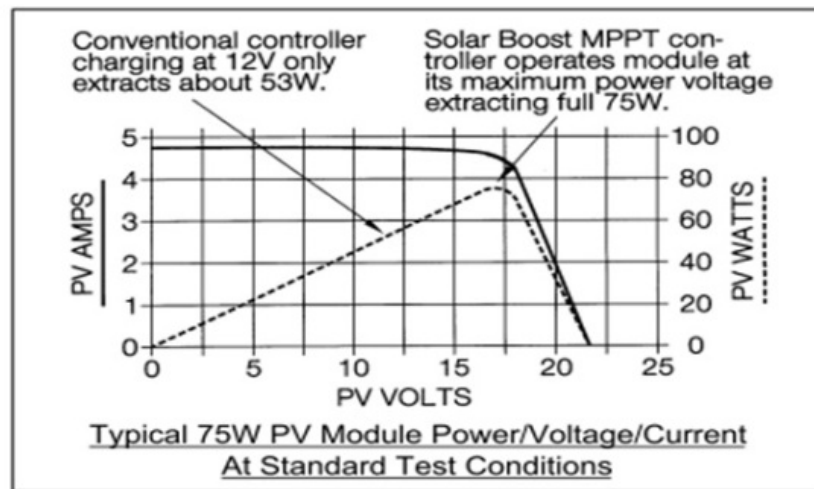


Figura 11. Diagrama del comportamiento de un sistema MPPT.

2.4. Transistor IGBT

En el mercado existen transistores con pequeñas variaciones en su estructura física y en su modo de empleo, desde los más comunes y simples como los BJT (*Bipolar Junction Transistor*), pasando por los FET (*Field Effect Transistor*) y MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) utilizados como periféricos en circuitos impresos ya sea como amplificadores o interruptores, hasta los más complejos y completos como son los CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), muy utilizados en la creación de la mayor parte de los dispositivos electrónicos, como lo son los circuitos integrados como amplificadores operacionales, compuertas lógicas, flip-flops, microcontroladores, memorias y en el desarrollo de microprocesadores y discos duros de estado sólido.

De los transistores mencionados anteriormente, existe un híbrido, que tiene las facilidades de manejo de voltaje que poseen los FET y MOSFET, y la capacidad de conducir altas corrientes como lo son los BJT, este híbrido es conocido como transistor IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Los IGBT son muy utilizados como interruptores para el control de dispositivos electrónicos de potencia debido a su capacidad de soportar corrientes en el orden de las decenas de Amperes y voltajes en el orden de kV.

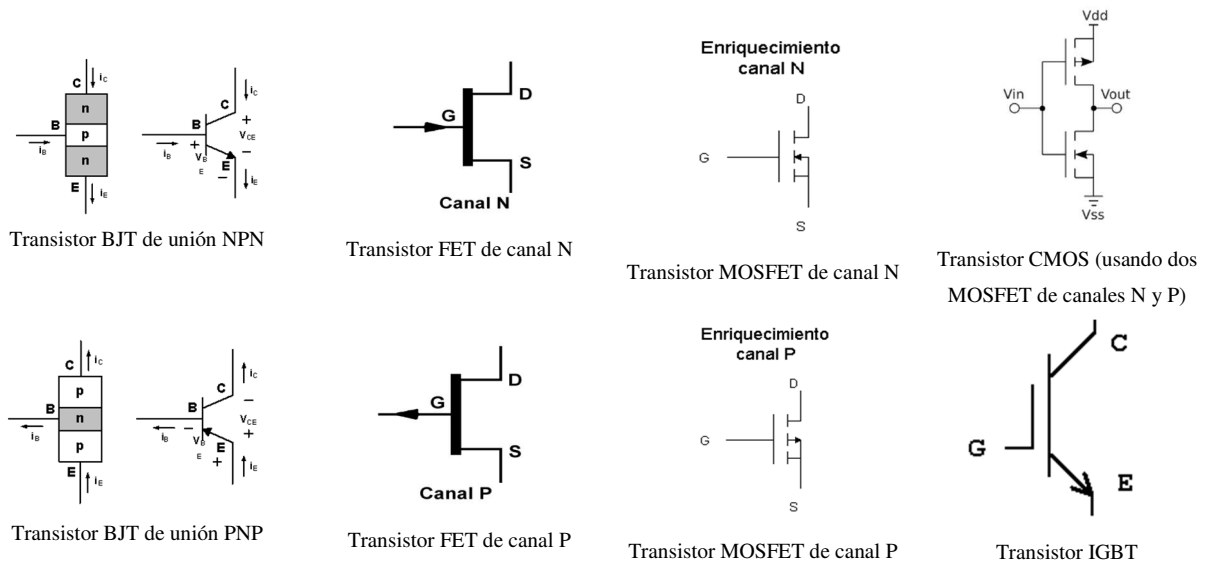


figura 12. Comparación de los transistores más usados en el mercado.

En su circuito equivalente, el transistor IGBT se representa en la figura 13, en donde se muestra claramente que, en la entrada, su comportamiento es como un transistor MOSFET, es decir, su manejo está controlado por voltaje, mientras que, a la salida, su comportamiento es como un BJT, el cual soporta altas corrientes y tiene un voltaje de saturación (encendido del transistor como interruptor) extremadamente bajo [14].

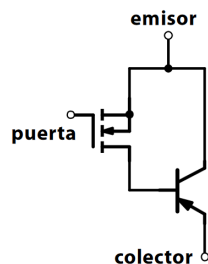


Figura 13. Circuito equivalente de un transistor IGBT.

3. METODOLOGÍA

Esta investigación se enmarca en un tipo de investigación aplicada que “busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo. Esta se basa fundamentalmente en los hallazgos tecnológicos de la investigación básica, ocupándose del proceso de enlace entre la teoría y el producto” [8]. Asimismo, se desarrollará con un diseño experimental “considerado como parte del proceso científico y una de las formas en que aprendemos acerca de la forma en que funcionan los sistemas o procesos” [9], es decir, que la presente investigación está basada en realizar experimentaciones durante el proceso de diseño y desarrollo del sistema de monitoreo y control en la medición de la energía eléctrica entregada entre el panel solar y la batería de litio al motor DC del vehículo, para encontrar el sistemas que mejor se adecúe al vehículo eléctrico. A continuación, los pasos a seguir para el desarrollo del proyecto son los siguientes:

3.1. Identificación de controladores que satisfagan las necesidades del vehículo solar.

3.1.1. Análisis de los elementos que funcionen como sistemas embebidos: se investigó cuáles serían los principales sistemas que se pudieran adecuar a este proyecto, entre ellos se pueden evaluar los siguientes: microcontroladores, FPGA's, DSP's, sistemas de hardware abierto y PLC.

3.1.2. Clasificación y comparación del sistema según la relevancia para el proyecto: ya identificados los posibles sistemas embebidos a elegir, se clasificaron según su relevancia en área de trabajo:

- **Microcontroladores (μC):** Estos sistemas de control son excelentes para la creación de proyectos miniaturizados, son de bajo consumo y ocupan poco espacio cuando se sabe optimizar las dimensiones, estos sistemas se encuentran encapsulados en forma de circuitos integrados (IC) tanto de inserción como de montaje superficial (SMD); existen de diferentes configuraciones en cuanto a memoria, RAM, velocidad de procesamiento, puertos disponibles de conexión a

periféricos y en su arquitectura interna, de estos existen varias marcas, las más comerciales son: Microchip (PIC), Atmel (ATMEGA), Motorola (Freescale) e Intel.



Figura 14. Microcontrolador PIC de la marca Microchip (SMD).

- **FPGA's:** Los campos de arreglos de compuertas programables (*Field Programmable Gate Array*) son un tipo de circuito integrado en donde su programación está orientada al desarrollo de hardware, es decir, a diferencia de los μC , una FPGA no está conformada por un procesador, memoria de almacenamiento y memoria temporal, sino, que su configuración es un arreglo matricial de compuertas NAND, con ellas se puede hacer desde algo tan sencillo como una compuerta lógica (AND, NAND, NOT, OR, NOR, XOR) hasta algo tan complejo como un procesador de 32 o de 64 bits. En el mercado, una de las marcas más reconocidas son las SPARTAN de la empresa XILINX.

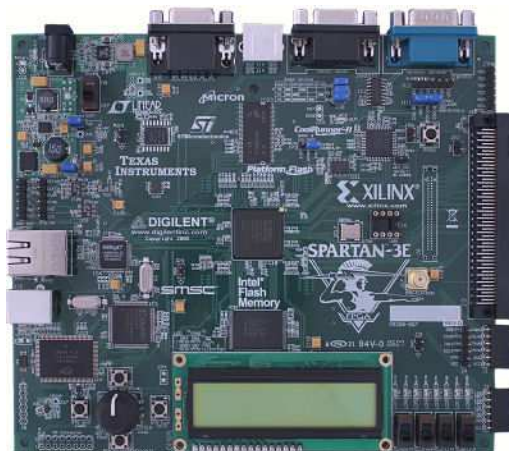


Figura 15. Tarjeta de desarrollo de una FPGA SPARTAN.

- **DSP:** Los procesadores de señales digitales (*Digital Signal Processor*), a diferencia de los procesadores convencionales (dícese de procesadores de PC), son un tipo especial de procesadores que están conformados con un hardware, software y set de instrucciones especializados en donde tienen la cualidad de procesar cualquier tipo de señal, ya sea sonora, eléctrica, o una imagen y realizarle su respectivo tratamiento, desde filtrados, ampliificaciones e incluso convoluciones (en el dominio de la frecuencia, transformadas de Laplace Fourier, etc.).

Las grandes diferencias de un DSP a comparación de un procesador normal, además de su arquitectura y programación, es que es capaz de realizar cálculos y procesar señales en tiempo real, es decir, sus tiempos de procesamiento, acción y reacción están muy ligados a la interacción de su entorno físico en un plazo de tiempo determinado.

En la industria y en el comercio, Texas Instruments es el fabricante líder en el diseño y creación de DSP's.



Figura 16. Chip de una DSP de Texas Instruments.

- **PLC:** acrónimo de *Programmable Logic Controller* (controlador lógico programable) es un sistema lógico usado exclusivamente en la industria, este sistema está hecho para automatizar procesos en las líneas de producción, este dispositivo se creó para reemplazar los voluminosos sistemas de relés y contactores que se usaban anteriormente, además de aumentar la producción y reemplazar la mano de obra por sistemas eléctricos y electrónicos completamente automatizados.

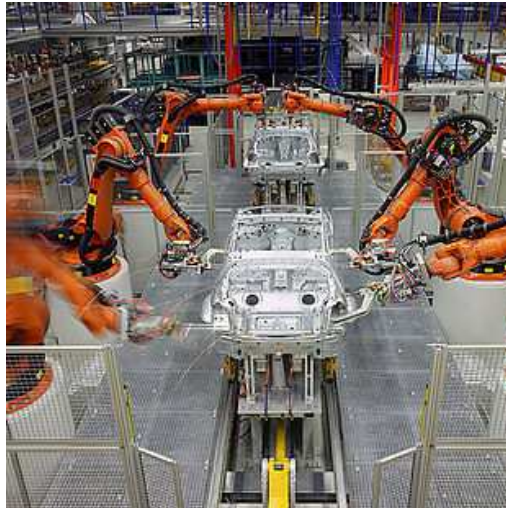


Figura 17. Línea de ensamble automatizado en una fábrica automotriz.

La invención del PLC se llevó a cabo luego de que Alemania y Francia, líderes en la industria automatizada, se dieran cuenta que la automatización industrial a mediados del siglo XX era insuficiente y poco práctica, por ello, se creó una convocatoria para la creación de un sistema con mayor capacidad de tareas y que mejore el rendimiento, este fue el inicio de los PLC's. actualmente, Siemens y Schneider son los fabricantes líderes en la creación de estos productos.



Figura 18. PLC de la marca Siemens.

- **Sistemas de hardware libre:** La necesidad de estudiantes, profesores y emprendedores en el mercado tecnológico e informático se va haciendo cada vez más grande a medida que la tecnología avanza, tal es el caso de querer enseñar o aprender sobre las ciencias de la programación que se hacía necesaria la creación de herramientas interactivas y de fácil uso; a pesar de que la idea surgió en la década de los 70, el concepto de hardware libre o de código abierto no se popularizó hasta recién entrado el siglo XXI, exactamente entre los años 2006 y 2010 con la creación de las tarjetas ARDUINO®, Raspberry Pi y Beagleboard; el primero, creado por estudiantes del Instituto de Ivrea (Italia) entre los años 2006 y 2007 [17], el segundo por la fundación que lleva el mismo nombre de la tarjeta en South Cambridgeshire, Reino Unido, con enfoque de asociación caritativa [18], pero no fue sino hasta el año 2012 cuando empezó la producción en masa con la versión Raspberry Pi modelo A [19] y el tercero y último hardware libre, las Beagleboard, creadas por Texas Instruments; son similares a las Raspberry, sus únicas diferencias son la apariencia física y su distribución de pines.

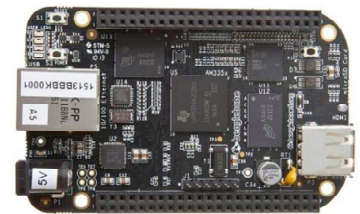
Los tres dispositivos mencionados anteriormente son los más populares, de hecho, existen otros tipos de tarjetas, como las Panda, Orange Pi, Banana Pi, entre otras.



Tarjeta Arduino UNO



Tarjeta Raspberry Pi 3



Tarjeta BeagleBone Black

Figura 19. Tarjetas de hardware libre.

3.1.3. Selección del sistema más adecuado para el circuito de control: Según lo planteado por el numeral 3.1.2. se descartan los siguientes sistemas con sus respectivos motivos:

- **FPGA:** podría ser conveniente debido a su alta capacidad de integrarse a los sistemas, pero el voluminoso tamaño de su tarjeta de desarrollo no la hace óptima para este proyecto.
- **DSP:** al igual que la FPGA, surge el inconveniente del tamaño, además de que necesita hardware adicional para el acondicionamiento de señales de potencia y es muy posible que tenga inconveniente con otro tipo de elementos.
- **PLC:** existe un motivo por el cual este no se puede integrar al vehículo eléctrico: se conecta directamente a la red eléctrica (necesita conectarse a 120V_{RMS} AC).
- **Sistemas de hardware libre:** Éstos sistemas pueden ser necesarios, pero en sistemas como los Raspberry Pi o Beagleboard se estarían perdiendo recursos y puertos de conexión que pueden ser muy necesarios para otro tipo de proyectos, además de ser demasiado costosos en Colombia, poco convenientes al momento de revisar el presupuesto.

Con lo anterior explicado, el sistema que más conviene para este proyecto es el uso del μC , en este caso se opta por el Atmega 328p de ATMEL®; este sistema se usó puesto que es una especie de híbrido entre un microcontrolador y un hardware libre, debido a que se puede programar con el IDE (*Integrated Development Environment*) propio de ARDUINO® y usarse como un microcontrolador sin ningún problema.

3.2. Diseño del controlador que satisfagan las necesidades del vehículo.

3.2.1. Métodos de instrumentación para la recolección de información y software empleado: Se consideran el voltaje, la corriente y la potencia como variables a analizar, para el voltaje y la corriente se usaron métodos directos para la recolección de

información, en cambio, para la potencia se usó un método indirecto para su respectiva medición.

el método que se usó para la medición de voltaje fue con el concepto del divisor de voltaje: este método, consta de dos resistencias en serie, según como se muestra en la figura 20:

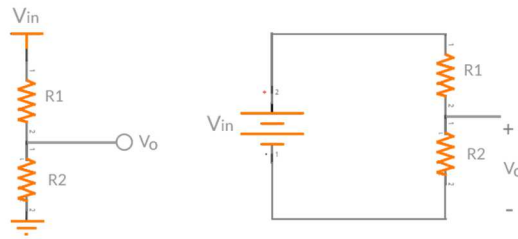


Figura 20. Diagrama de un divisor de voltaje.

La toma de datos se da entre R₂ y GND (tierra) y, según la ley de Ohm y la 1ª ley de Kirchhoff, o la ley de voltajes de Kirchhoff (LVK), que dice:

“En un lazo cerrado, la suma de todas las caídas de tensión es igual a la tensión total suministrada. De forma equivalente, la suma algebraica de las diferencias de potencial eléctrico en un lazo es igual a cero”¹

Haciendo el respectivo análisis de mallas se tiene:

$$V_{in} = I \cdot (R_1 + R_2) \quad (1)$$

Donde V_{in} es el voltaje de la fuente, I es la corriente del circuito y R₁ y R₂ son las resistencias en serie, ahora, se halla el voltaje en R₂:

$$V_{R_2} = I \cdot R_2 \quad (2)$$

¹ Definición de la primera ley de Kirchhoff.

Ahora, se reemplaza (2) en (1), teniendo en cuenta que V_{R_2} es el voltaje de salida, ahora se denominará V_o .

$$I = \frac{V_{R_2}}{R_2}$$

$$I = \frac{V_o}{R_2}$$

$$V_{in} = \frac{V_o}{R_2} \cdot (R_1 + R_2)$$

$$V_{in} \cdot R_2 = V_o \cdot (R_1 + R_2)$$

$$\frac{V_{in} \cdot R_2}{(R_1 + R_2)} = V_o \quad (3)$$

Reorganizando la ecuación se tiene:

$$V_o = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \cdot V_{in}$$

Según lo obtenido en la ecuación (3), se debe usar un amplificador en modo seguidor de tensión para que el microcontrolador identifique que éste es el voltaje de la fuente a medir y no el voltaje de la resistencia.

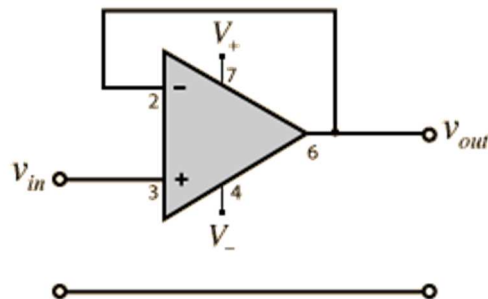


Figura 21. Amplificador operacional en modo seguidor de tensión.

Cabe aclarar que este acondicionamiento se hace para reducir un voltaje alto (50V y 60V) a un voltaje que el sistema pueda identificar sin tener daños que afecten la medición, en este caso, se usa un voltaje de salida de 5V, pero, se debe tener en cuenta un factor de holgura del 10%, un factor de holgura es la brecha entre un valor tope que se desea medir y el valor máximo real que se debe calcular, por esto, en lugar de tomar un valor máximo de 5V, se usa un valor máximo de 4.5V, así si los voltajes del panel y de la batería sobrepasan las medidas especificadas, no habrá inconvenientes que afecten al microcontrolador.

Además de acoplar impedancias, el seguidor de tensión funciona como un seguro extra en caso de un sobre voltaje del panel o de la batería, así como se muestra en la figura 22:

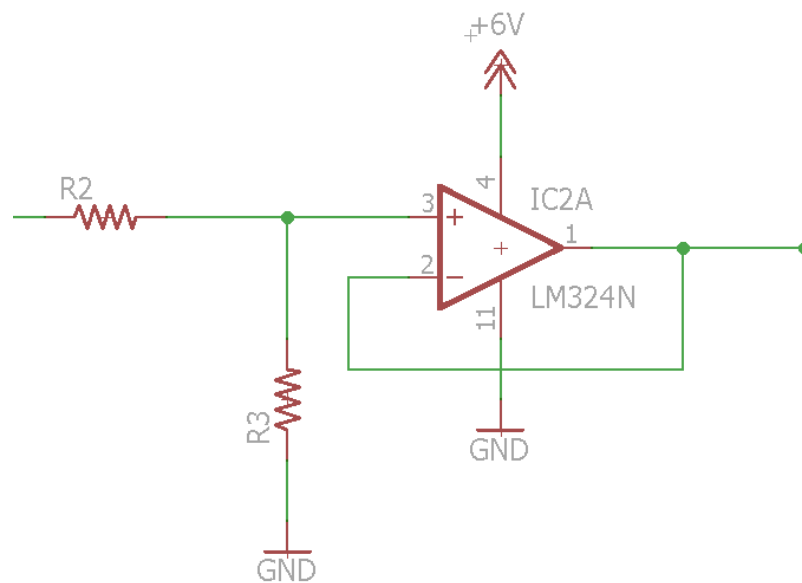


Figura 22. Circuito divisor de tensión con amplificador en modo seguidor a la salida.

Después de tener en cuenta el sistema de acondicionamiento para el cálculo de los voltajes del panel y la batería, se procedió a resolver el sistema de medición de la corriente, para este caso, se usaron dos sensores de efecto Hall, este sensor es ideal para estas mediciones ya que no desperdicia energía en forma de calor, a diferencia de las resistencias shunt, que se pueden recalentar hasta el punto de quemarse o dañar el circuito.

Los sensores de efecto hall que se utilizarán son el ACS712 y el ACS 758, el primero, tiene una tolerancia hasta de 20A y el segundo, de 50A.



Figura 22. Sensor ACS712(izquierda) y sensor ACS758(derecha).

El ACS712 se usó en la etapa entre el panel y la batería, para entregar la corriente entregada hacia la batería y el ACS 758 para medir la etapa entre la batería y el motor, este último tiene una potencia máxima de consumo de 2kW, si se tiene en cuenta que el voltaje promedio oscila entre los 48V-50V, la corriente que puede llegar a consumir debe estar entre los 40A-42A, es por ello que se recurrió a este tipo de sensor.

Por último, la potencia consumida entre todo el sistema es la multiplicación de ambas mediciones (corrientes y voltajes), por ello se dijo anteriormente que en ésta parte se usó un método indirecto, puesto que el resultado de la potencia se da mediante una parte del algoritmo del microcontrolador donde realiza las operaciones las muestras analizadas.

3.2.2. Opciones de adecuación de voltaje para el sistema fotovoltaico: El sistema debe trabajar a un nivel de 5V y estar estable en ese valor, por ello, en un principio se pensó en utilizar el método del divisor de tensión y conectar a la salida de este un regulador de voltaje para garantizar los 5V constantes, tal como se muestra en la figura 23:

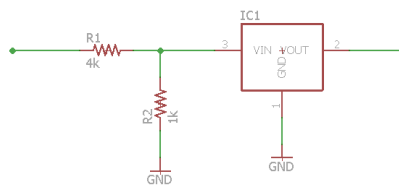


Figura 23. Regulador de tensión en cascada con divisor de tensión.



Figura 24. Regulador de 5V referencia AMS1117.

El inconveniente surge cuando la idea de este proyecto es garantizar la menor pérdida de energía posible, caso que el método anteriormente descrito no cumple debido que, según la ecuación (4):

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \cdot 100 \quad (4)$$

En donde P_o es la potencia de entrada, P_i es la potencia de salida y η es la eficiencia de potencia (su valor oscila entre 0 y 1, donde 0 representa el 0% de transferencia de energía y 1 el 100%, es decir, la máxima transferencia hacia la carga); teniendo esto en cuenta, reducir una tensión de 50V a una de 10V (entre batería y resistencias) y luego reducir de 10V a 5V (entre resistencias y el regulador mostrado en la figura 24) y que la circulación de corriente del sistema controlador esté en los 200mA, da a entender que la disipación de potencia puede ser un poco alta, es decir, habrá potencia desperdiciada en forma de calor; teniendo claro la corriente que circulará por el sistema controlador y su voltaje, la potencia estará alrededor de 1W, que podrá ser poco para un sistema fotovoltaico de potencia, pero es una potencia que no se puede dar el lujo de desperdiciar, porque si en el proceso de reducción de voltaje, la eficiencia del consumo

de potencia del controlador dependerá de su alimentación, es decir, si la regulación del sistema de control disipa alrededor de 2W en forma de calor, usando la ecuación (4):

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot 100$$

$$\eta = 0,5 \cdot 100$$

$$\eta = 50\%$$

El método de regulación con divisor de tensión es poco eficiente, ya que se disipa el 50% de la transferencia de la energía en forma de calor desde la batería hasta el sistema de control fotovoltaico.

Es por ello que se ha buscado otra solución para la reducción del voltaje a los 5V que necesita el sistema de control para alimentarse, esta solución es con el método del conversor DC-DC buck, un sistema usado en la electrónica de potencia el cual reduce un voltaje DC a otro de menor valor, también DC, este sistema se hace con el circuito integrado LM2576HVS, un circuito que es capaz de soportar hasta 60V a su entrada y el cual genera una señal PWM que será enviada a una circuitería externa para la reducción del voltaje (ver figura 25), el cual puede ser ajustado por medio de un potenciómetro o un trimmer.

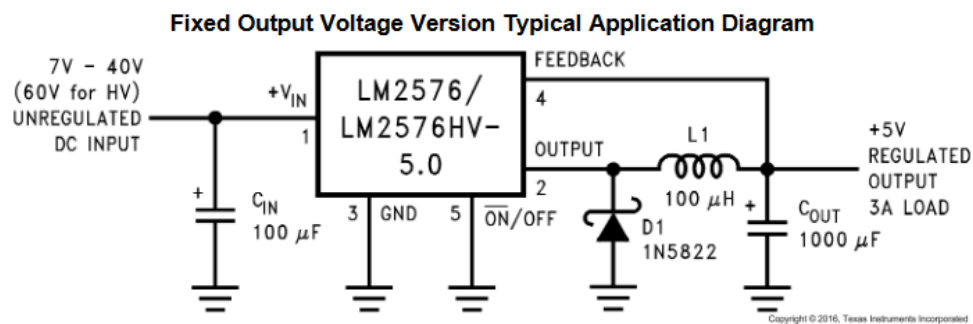


Figura 25. Diagrama circuital de cómo se conecta el LM2576HVS.



Figura 26. Circuito integrado LM2576HVS.



Figura 27. Un LM2576HVS en la placa circuital.

El método del conversor buck, es mucho más eficiente que el método del divisor y regulador de tensión, ya que se comporta como una “fuente conmutada” en donde regula el voltaje de salida a partir del ciclo útil del PWM, como resultado, este dispositivo es capaz de tener una eficiencia superior al 90% (en ciertos casos puede llegar hasta el 98% de eficiencia). Es así como se opta por este sistema de regulación para alimentar al sistema controlador fotovoltaico.

3.2.3. Medir las dimensiones del lugar en donde se adecuará el sistema: luego del análisis de medir voltajes, corrientes, potencias y cuál es el método de alimentación del circuito controlador, se procede a inspeccionar cuál fué el lugar más indicado para acoplar el sistema regulador en el vehículo solar del SIER, el lugar más tentador es mostrado en la figura 28:



Figura 28. Vehículo del SIER y lugar dónde se instalará el sistema de control.

Se realizaron las mediciones respectivas y las dimensiones que más se adecúan al lugar de posicionamiento son de 20x40x10 cm; el circuito de control estará instalado en una caja acrílica que funciona como protección contra el exterior (protección contra humedad, salpicaduras y polvo).

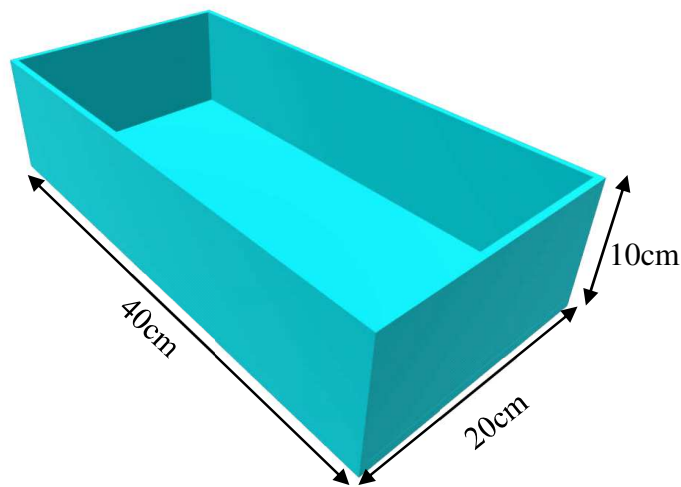


Figura 29. Dimensiones de la caja protectora del circuito de control.

Además, cuenta con conectores polarizados para cada una de las conexiones para asegurar que, cuando haya una desconexión completa, no haya confusión en la reconexión de cada uno de los componentes.



Figura 30. Conexiones de polarización del circuito (izquierda) y salida hacia el regulador del motor (derecha).

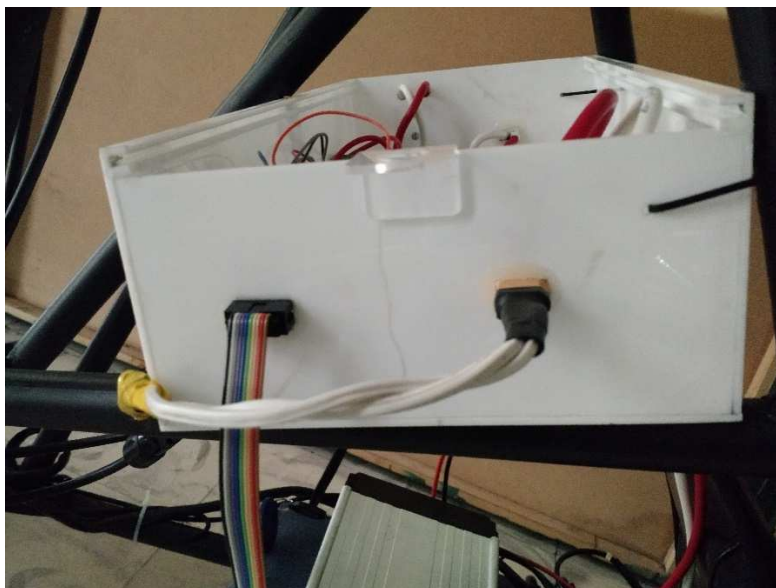


Figura 31. Conexiones hacia pantalla LCD y LED indicador (izquierda) y entrada del panel solar al circuito (derecha).



Figura 32. Entrada de la batería al circuito regulador.

Finalmente, así queda ensamblado el regulador para el sistema fotovoltaico:

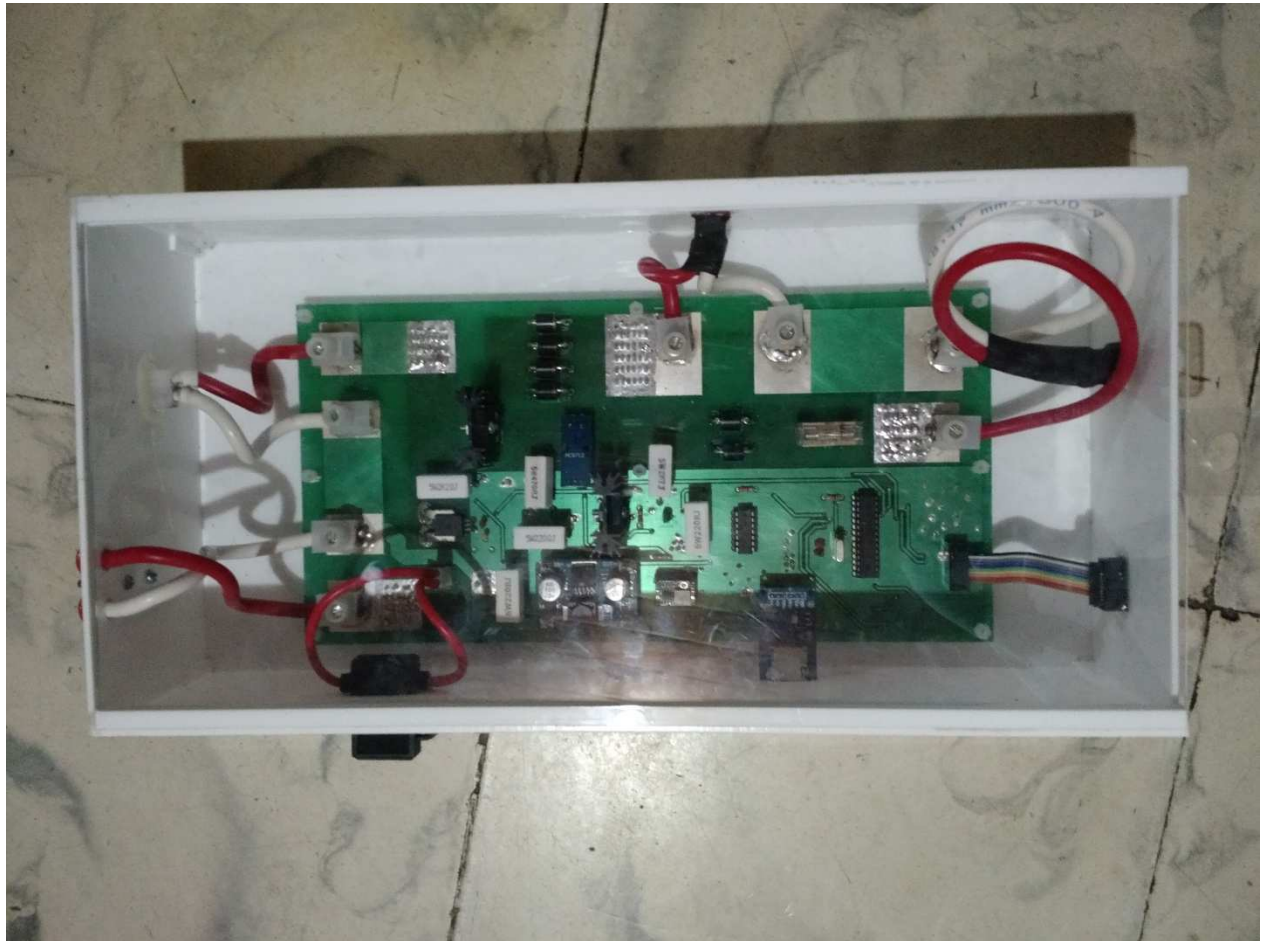


Figura 33. Vista superior del regulador.

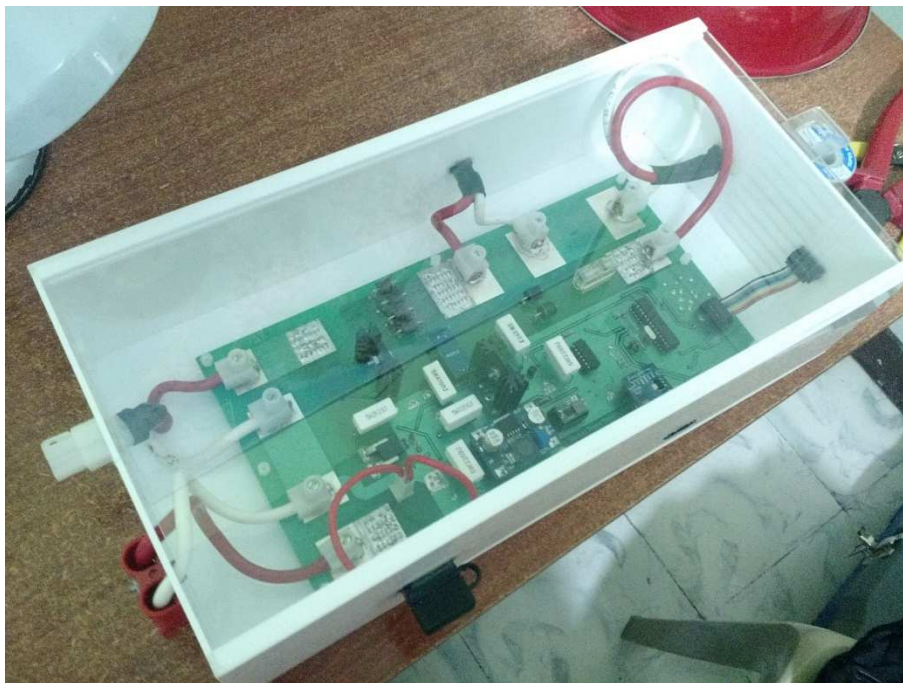


Figura 34. Vista lateral del regulador fotovoltaico.

Y su respectiva pantalla LCD:

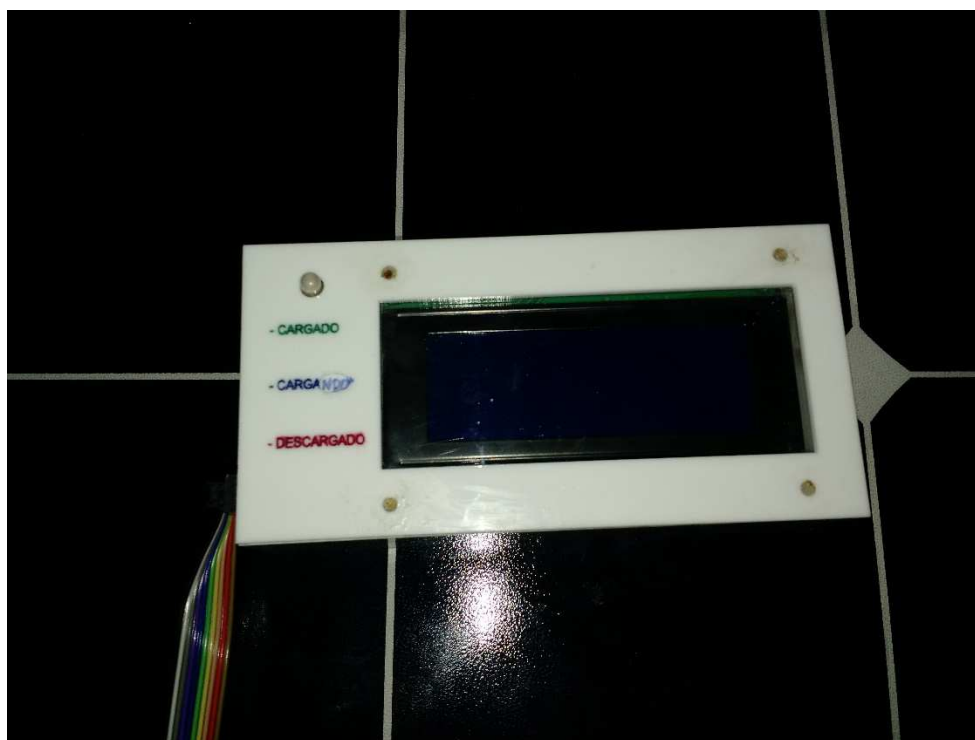


Figura 35. Pantalla LCD del regulador con su respectivo LED RGB indicador.

3.3. Implementación y evaluación del sistema controlador.

Figura 36. Diagrama esquemático del circuito de control.

En la parte superior de la figura 30 se aprecia lo que es donde va la señal de potencia por varias etapas, la primera, del panel a la entrada de la batería, donde se encuentra el muestreo de voltaje y corriente y el sistema de control de voltaje (mediante el transistor IGBT y su respectivo sistema de control), la segunda etapa es de la salida de la batería hacia el sistema de regulación del motor, en ella también se aprecia el muestreo de voltaje y corriente, con una pequeña variación en el sensor de corriente, el cual, este puede soportar mayores corrientes (hasta 50A) y por último, en la parte inferior de la figura, se aprecia el sistema de control con el microcontrolador Atmega 328p, los conectores de las fuentes de alimentación y el conector del lector de tarjetas micro SD.

3.3.1. Diseño de la tarjeta de circuito en el programa EAGLE®: De acuerdo con estándares técnicos (IPC, IEEE, IEC) el diseño de pistas en una placa de circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés) debe ser en función a la corriente máxima que circulará por ella, es decir, el ancho de una pista de PCB debe ser proporcional a la corriente que circula por ella, por ello, se estima que, para la PCB del sistema de control, en la parte de potencia, las pistas deben medir al menos una pulgada (1”) de ancho para poder soportar una corriente de 50A, la cual es la que circula hacia el motor quien es el que demanda esta cantidad de corriente.

Por otro lado, la PCB posee la circuitería del sistema de control, en donde sus pistas no superan $\frac{1}{4}$ de pulgada en su ancho:

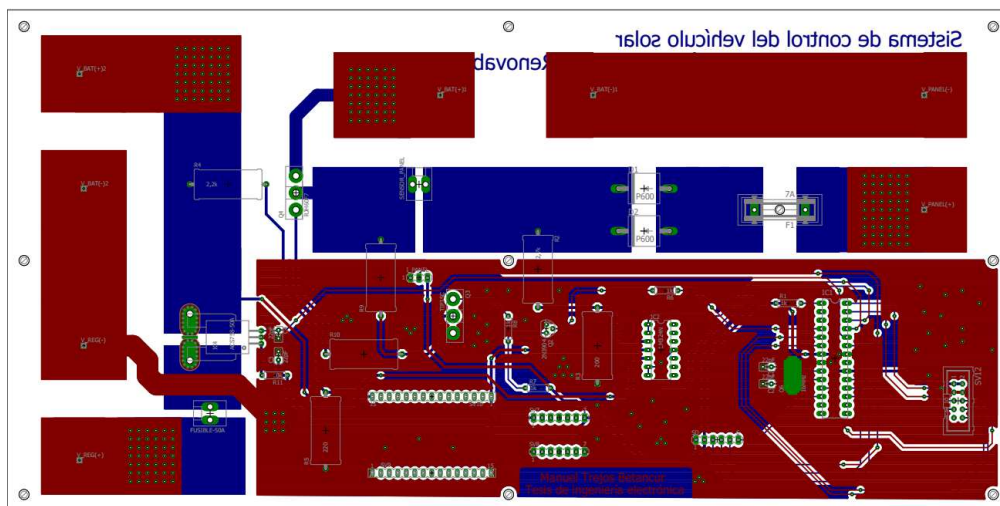


Figura 37. PCB terminada del sistema de control.

En las partes superior e izquierda, se observan las pistas por donde circulará la señal de potencia (panel, batería y regulador), mientras que, en la parte inferior derecha, se encuentra el sistema de control y monitoreo con su respectiva alimentación.

Desafortunadamente, durante el periodo de análisis y extracción de muestras, el motor tuvo una avería, por lo cual, quedó bloqueada magnéticamente y por lo tanto el regulador de éste no podía hacer excitar el inducido interno del motor, este problema fue externo al desarrollo de este proyecto, por lo que no se pudo terminar como se esperaba.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se diseñó un sistema de regulación de voltaje para la carga de la batería por medio de un panel solar en el vehículo del SIER; dicho diseño se creó en el programa CAD para diseño de circuitos impresos EAGLE®.
- El componente encargado de la regulación de voltaje para la carga de la batería es el transistor IGBT RJH60F7, capaz de soportar voltajes y corrientes de hasta 600V y 90A.
- El controlador encargado de dar las órdenes de los tiempos de carga al IGBT es el ATMEGA328p mediante la toma de muestras de voltajes y corrientes.
- El sistema también cuenta con una pantalla LCD y un LED RGB indicador que le muestran al conductor el estado energético del panel y de la batería.
- El sistema está puesto en una caja de acrílico en donde se conectan todos los componentes del vehículo para la toma de datos y regulación de carga.
- Se usó un módulo para adaptar una tarjeta microSD al sistema, para así, poder ver los resultados graficados mediante el programa de MATLAB®.

4.2. RECOMENDACIONES

- El modelo de control de carga por PWM ha presentado resultados satisfactorios, pero, para una optimización de recursos, se puede integrar dentro del circuito, un convertidor buck para un mayor control de corriente y voltaje, para así, tener un control de carga por el método de MPPT.
- El ATMEGA328p, tiene la desventaja de tener poca capacidad de memorias Flash y RAM, por lo que a veces, presenta desbordamientos de memoria y genera errores en la pantalla LCD, para solucionar este problema, se puede recurrir al ATMEGA2560, el cual, además

de contar con muchos más pines, cuenta con una capacidad de memoria superior que el ATMEGA328p, por tal motivo, no presentará las fallas que a veces presenta el microcontrolador usado en este proyecto.

- Al ser este el primer diseño de un sistema que regula la carga de la batería del vehículo solar del SIER, tiene una apariencia un poco tosca, por ello, en versiones futuras, se puede recurrir a la miniaturización de los elementos, tales como resistencias, conectores, microcontrolador, etc. Haciendo así que los futuros diseños sean más compactos, ligeros y de fácil adecuación y manipulación.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] BBC, «¿Por qué terminamos usando gasolina si ya teníamos autos eléctricos y de vapor?,» 28 febrero 2016. [En línea]. Available: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/02/160225_autos_electrico_vapor_gasolina_hidrogeno_finde_dv.
- [2] D. García Artés, «Los límites de la eficiencia térmica en motores gasolina y diésel,» 2 octubre 2012. [En línea]. Available: <http://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/10/02/los-limites-de-la-eficiencia-termica-en-motores-gasolina-y-diesel/>.
- [3] T. M. I. «www.teslamotors.com,» 4 Marzo 2016. [En línea]. Available: https://www.teslamotors.com/es_MX/about.
- [4] Oficina de comunicaciones UTP, «El Carro Solar de la UTP,» Pereria, 2014.
- [5] OICA, «www.oica.net,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.oica.net/wp-content/uploads//total-inuse-2014.pdf>. [Último acceso: 10 octubre 2016].
- [6] OICA, «www.oica.net,» [En línea]. Available: <http://oica.net/wp-content/uploads/climate-change-and-co2-brochure.pdf>. [Último acceso: 11 octubre 2016].
- [7] H. Maleki y J. N. Howard, «Effects of overdischarge on performance and thermal,» Motorola Mobile Devices, Lawrenceville, 2006.
- [8] V. García Pérez, Seguimiento del punto de máxima potencia de un panel solar para la carga de baterías de sistemas portátiles, Valencia, España, 2008.
- [9] M. Pareja Aparicio, Radiación solar y su aprovechamiento energético, Barcelona (España): marcombo, 2010.
- [10] E. M. Benavides Farías y H. P. Rosario Morales, Implementación de un sistema de regulación para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos, Quito, 2010.
- [11] H. L. Gasquet, Manual sobre los sistemas fotovoltaicos, El Paso: Sola Energy Association, 2007.
- [12] H. Maleki y J. N. Howard, «Effects of overdischarge on performance and thermal stability of a Li-ion cell,» Lawrenceville, 2006.

- [13] L. Boyano Vannucchi, Diseño, construcción y validación experimental de un inversor monofásico con control digital conectado a la red para paneles fotovoltaico, Madrid, 2009.
- [14] R. Pérez, M. Román y G. Velasco, «Estudio eléctrico y térmico en transistores IGBT en paralelo con control de reparto de corriente,» Barcelona, 2014.
- [15] J. Lozada, «Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria,» *Revista de Divulgación Científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, pp. 34-39, 2014.
- [16] C. Henicke, «Diseño experimental,» de *Diseño experimental*, p. 60.
- [17] D. Kushner, «spectrum.ieee.org,» IEEE, 26 octubre 2011. [En línea]. Available: <http://spectrum.ieee.org/geek-life/hands-on/the-making-of-arduino>. [Último acceso: 7 diciembre 2016].
- [18] Raspberry Pi Foundation, «raspberrypi.org,» 6 junio 2011. [En línea]. [Último acceso: 7 diciembre 2016].
- [19] R. Cellan-Jones, «bbc.com,» BBC, 29 febrero 2012. [En línea]. Available: <http://www.bbc.com/news/technology-17190918>. [Último acceso: 7 diciembre 2016].
- [20] H. L. Menchaca Torre y A. Mendoza Domínguez, «Desempeño de un vehículo híbrido y su contraparte de combustión interna bajo condiciones de manejo de una ciudad mexicana,» *Revista internacional de contaminación ambiental*, 2013.
- [21] P. M. Muñoz, E. W. Moschen, G. Correa Perelmuter y L. Mathe, «Selección y dimensionamiento de un vehículo eléctrico híbrido propulsado por celdas de combustible. Comparación y análisis con un vehículo de combustión interna,» Bariloche, 2014.
- [22] Advanced Monolithic Systems, «<http://www.advanced-monolithic.com>,» [En línea]. Available: <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>. [Último acceso: 15 diciembre 2016].